HAL
open science

NOUVELLE MÉTHODE DE SELECTION ENVIRONNEMENTALE DES MATERIAUX POUR LA FIN DE VIE DES PRODUITS PAR EVALUATION FLOUE EN PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE

Christian Mascle, Fabien Deneu

To cite this version:

Christian Mascle, Fabien Deneu. NOUVELLE MÉTHODE DE SELECTION ENVIRONNEMENTALE DES MATERIAUX POUR LA FIN DE VIE DES PRODUITS PAR EVALUATION FLOUE EN PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE. 9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation, Jun 2012, Bordeaux, France. hal-00728670

HAL Id: hal-00728670

https://hal.science/hal-00728670v1

Submitted on 30 Aug 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

9e Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation - MOSIM'12
06 au 08 Juin 2012 - Bordeaux - France
« Performance, interopérabilité et sécurité pour le développement durable »

NOUVELLE MÉTHODE DE SELECTION ENVIRONNEMENTALE DES MATERIAUX POUR LA FIN DE VIE DES PRODUITS PAR EVALUATION FLOUE EN PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE

C. Mascle et F. Deneu

École Polytechnique de Montréal
Département de génie mécanique
C.P. 6079, Succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) - H3C 3A7 Canada
christian.mascle@polymtl.ca, fabien.deneu@polymtl.ca

RESUME : *Le choix de matériaux appropriés pour la fin de vie des produits est devenu un problème important à la suite de l'accroissement des impacts provoqués dans l'environnement par les déchets et les besoins de la renaissance des produits et des matériaux (remise en état et à neuf, réutilisation, recyclage avec ou sans désassemblage). Une manière de résoudre ce problème est d'optimiser la conception des produits pour leur fin de vie, qui doit être adéquatement choisie dès le début de leur développement, dans le but de minimiser les impacts environnementaux, de respecter les lois, tout en maximisant le bénéfice économique. La méthode ECMSPEOL (Environmental and Contextual Materials Selector for Product End-Of-Life) décrite dans cet article est un outil systémique simple et rapide destiné aux concepteurs afin de les aider dans le processus de prise de décision menant au choix de matériaux pour la fin de vie des produits. ECMSPEOL est construite en utilisant le principe d'extension de la logique floue et la théorie d'arithmétique floue appropriés, dans le contexte incertain et imprécis dans lequel se trouve le concepteur au début de la phase de conception. Son utilisation est illustrée par une étude de cas sur un cylindre pneumatique.*

MOTS-CLES : *Choix de matériaux, fin de vie, renaissance, conception préliminaire, logique floue.*

1 INTRODUCTION

Les sciences et les techniques se sont imposées jusqu'à être omniprésentes dans les produits que nous utilisons quotidiennement. Ces développements ont permis l'émergence de nouveaux modes de consommation des produits : consommation de masse, consommation frénétique, etc. Ils ont décuplés les effets indésirables de l'industrie sur l'environnement : épuisement de ressources non-renouvelables, contamination des sols et de l'air, génération de pluies acides, etc. Pour illustration : en 2007, plus de 372 millions de produits électroniques, représentant plus de 2,25 millions de tonnes de déchets, ont été déclarés en fin de vie uniquement au sein des Etats-Unis. Sur cette quantité seulement 18,4% ont été recyclés (EPA, 2007). Cela laisse plus de 300 millions de produits enfouis dans les décharges des Etats-Unis.

Dans ce contexte, la sélection des matériaux a été une des premières préoccupations des législateurs et par conséquent des industriels. L'interdiction d'utilisation d'un nombre important de substances toxiques et dangereuses a permis de diminuer l'impact environnemental des produits. Par la suite, l'analyse du cycle de vie s'est imposée comme l'outil principal de sélection environnementale des matériaux. Cet outil est très fiable et efficace pour sélectionner les matériaux les plus respectueux de l'environnement en réalisant l'inventaire de leur cycle de vie. Cependant, nous constatons que les méthodes de sélection des matériaux ne prennent pas en compte le contexte d'utilisation du matériau. Ce contexte d'utilisation est composé :

- du produit dans lequel le matériau sera intégré;
- de l'environnement général du produit.

Le travail de recherche présenté dans cet article porte sur la sélection environnementale des matériaux dans leur contexte d'utilisation. C'est une approche systémique, où le matériau est considéré non pas pour lui-même, mais dans le contexte d'utilisation parmi d'autres matériaux. La question à laquelle nous essayons de répondre est : **La prise en compte du contexte d'utilisation du matériau modifie-t-elle la sélection environnementale d'un matériau?**

La sélection des matériaux a toujours été une tâche importante du développement des produits. Les matériaux impactent très fortement les propriétés et qualités futures d'un produit durant toute son utilisation et sa fin de vie (FdV). Ils constituent donc un véritable levier pour améliorer les caractéristiques environnementales des produits. La prise de conscience écologique des populations s'est traduite par des actions associatives, politiques et par un durcissement de la législation. Aujourd'hui, les politiques de développement durable poussent les concepteurs à faire de plus en plus attention aux impacts environnementaux des produits conçus et à leur comportement pendant les différentes phases du cycle de vie du produit. Le compromis entre les avantages et les incon-

vénients techniques, économiques et environnementaux des matériaux (Karana *et al.*, 2008) devient donc de plus en plus difficile à réaliser par la multiplication des facteurs à évaluer. Par exemple, le nombre de matériaux est en constante augmentation : Ljungberg (Ljungberg, 2007) évalue à 100 000 le nombre de matériaux commercialisés.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Les différents types de méthodes de sélection environnementale des matériaux rencontrées dans la littérature sont divisés en trois catégories :

- les règles de sélection ;
- l'analyse du cycle de vie ;
- les méthodes multicritères.

2.1 Règles de sélection

Les règles de sélection environnementales sont nombreuses dans la littérature. Nous avons recensé seize règles de sélection environnementale :

- règle n°1: minimiser la toxicité des matériaux
- règle n°2: maximiser l'utilisation des matériaux qui demandent une faible consommation d'énergie pour leur production.
- règle n°3: maximiser l'utilisation des matériaux provenant de ressources renouvelables.
- règle n°4: maximiser l'utilisation des matériaux composés de matière recyclée.
- règle n°5: minimiser la quantité de matériaux utilisés dans les produits.
- règle n°6: maximiser l'utilisation de matériaux recyclables.
- règle n°7: maximiser l'utilisation de matériaux compatibles pour le recyclage.
- règle n°8: minimiser la diversité des colorants présents dans les matériaux.
- règle n°9: maximiser l'utilisation de peintures et de revêtements sur les matériaux pour les produits qui ont une fin de vie de type « Remanufacture ».
- règle n°10: minimiser l'utilisation de peintures et de revêtements sur les matériaux pour les produits qui ont une fin de vie de type « Recycle ».
- règle n°11: minimiser la compositivité des matériaux dans un composant.
- règle n°12: maximiser le marquage des composants pour l'identification des matériaux.
- règle n°13: minimiser la diversité des matériaux dans le produit.
- règle n°14: optimiser la durabilité du matériau par rapport à la fin de vie.
- règle n°15: maximiser la résistance à la corrosion des matériaux.
- règle n°16: maximiser la dégradabilité des matériaux.

Le tableau 1 résume les références et le domaine d'application de chaque règle dans le cycle de vie. Ce type de méthode de sélection convient parfaitement pour la sélection en conception préliminaire. Ce sont également les règles de sélection qui permettent de prendre en compte le contexte de la sélection des matériaux (produits, environnement physique, …). Cependant le concepteur a une trop grande liberté dans le processus d'évaluation pour qu'elles permettent une évaluation fiable et répétable.

Règle	Références	Étapes du cycle de vie		
		Fabrication	Utilisation	FdV
1	[3-11]	X	X	X
2	[6, 7, 9-11]	X		
3	[7, 10, 12]	X		
4	[3, 7, 11]	X		
5	[3, 7, 11]	X		
6	[3-8, 10-13]			X
7	[3-8, 10-13]			X
8	[6, 9]			X
9	[11]			X
10	[6, 7]			X
11	[6, 7]			X
12	[3, 6, 7, 9, 12]			X
13	[3, 6-7, 9, 11-12, 14]			X
14	[6, 8]			X
15	[3, 7, 8]			X
16	[3-5, 7, 12]			X

Tableau 1: domaine de validité des règles de sélection
(Les chiffres entre crochets [] sont inscrits à la fin des références dans la liste située à la fin de l'article.)

2.2 Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie est une méthode qui s'est imposée dans les années 90 comme la référence dans l'évaluation des produits et de leurs impacts environnementaux. Issue de la pensée cycle de vie, elle permet de quantifier les impacts générés tout au long du cycle de vie du produit et de quantifier pour un produit et son cycle de vie associée, l'empreinte environnementale. Bien que l'objectif de l'analyse du cycle de vie ait une orientation produit elle est également utilisée pour sélectionner les matériaux en quantifiant les impacts environnementaux des matériaux. Plusieurs bases de données stockant les résultats de différentes ACV ont été créées pour faciliter la diffusion de l'ACV: Eco-indicateurs 95, 99 (Goedkoop, 1995 et 1999) ; Impact 2002+ (Jolliet, 2003) ; Eco'Invent (Frischknecht, 2005). Cependant, l'ACV par son besoin important de données précises ne peut être appliquée qu'en conception détaillée (Pahl et Beitz, 2007), ce qui est montré dans la figure 1. Elle demande une précision des informations qui la rend incompatible avec la conception préliminaire.

2.3 Méthodes multicritères

Les méthodes multicritères sont le dernier type de méthode de sélection environnementale rencontré dans la littérature. Elles peuvent être elles-mêmes de plusieurs types: graphiques, analytiques ou d'optimisation. Elles permettent de prendre en compte le critère environnemental des matériaux et des critères techniques ou économiques. Les méthodes graphiques environnementales sont dérivées des diagrammes d'Ashby (Ashby, 2005).

Weaver (Weaver *et al.*, 1996) et Holloway (Holloway, L., 1998) présentent une application de cette méthode. Les méthodes analytiques environnementales sont très utilisées. Huang (Huang, H. *et al.*, 2006) réalise la sélection des matériaux avec une méthode dérivée de TOPSIS (Shanian and Savadogo, 2006). Chan (Chan and Tong, 2007) réalise la sélection environnementale des matériaux par l'analyse relationnelle Grey. Ribeiro (Ribeiro *et al.*, 2008) et Guidice (Giudice *et al.*, 2005) présentent des méthodes utilisant les résultats de l'éco-indicateurs'99. Zhou (Zhou *et al.*, 2009) et Ermolaeva (Ermolaeva *et al.*, 2004) présentent deux méthodes d'optimisation du choix environnemental des matériaux. Les méthodes multicritères qui se basent sur l'ACV conservent son défaut : les résultats ne sont exploitables qu'en conception détaillée.

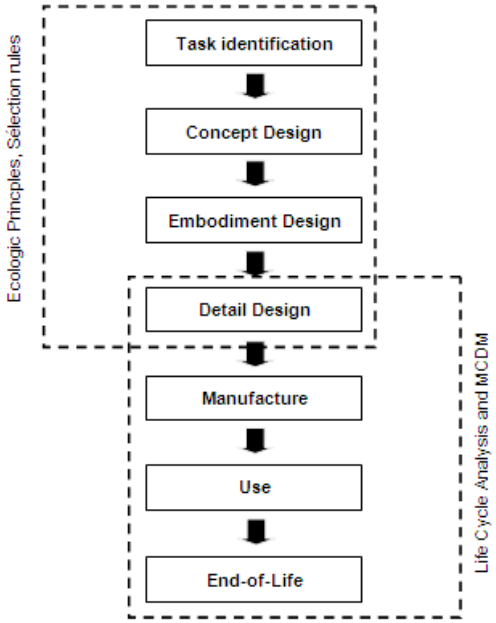

Figure 1: relations entre le développement de produit et les méthodes de sélection des matériaux. Adapté de (Pahl et Beitz, 2007).

2.4 Problématique en conception préliminaire

La conception préliminaire n'a pas de méthode de sélection des matériaux formalisée comme Pahl et Beitz le confirment (Pahl et Beitz, 2007). Le concepteur peut uniquement utiliser les règles de sélection Or celles-ci ont plusieurs défauts : l'efficacité de la sélection environnementale des matériaux dépend principalement des concepteurs ou des équipes de conception qui les utilisent. Et elles ne reposent pas sur un processus de sélection bien défini et fiable, ce qui peut entrainer des changements néfastes dans la sélection des matériaux.

La sélection des matériaux en conception préliminaire est un problème qui est très peu traité du point de vue environnemental contrairement à la sélection technique en conception préliminaire, qui est traitée par quelques auteurs. Ainsi, Thurston (Thurston and Locascio, 1994) plaide pour l'utilisation de la logique floue. Des méthodes de sélection techniques des matériaux par logique floue ont été présentées. Wang expose une méthode de sélection de matériaux pour un outil de coupe (Wang and Chang, 1995). La sélection repose sur l'évaluation de sept propriétés des matériaux : usinabilité, résistance à l'eau, résistance à l'adoucissement à température élevée, dureté, sécurité pendant la trempe, stabilité des propriétés des matériaux, coût d'achat du matériau. La méthode requiert une pondération de chaque propriété par le concepteur. Après renseignement des valeurs des propriétés, la méthode fournit au concepteur un classement des différents matériaux. Chen (Chen, 1997) propose une méthode plus légère au niveau des calculs à effectuer. Il illustre cette méthode avec la sélection de matériaux pour outil de coupe. Dernièrement, Sarfaraz Khabbaz a exposé une méthode de sélection des matériaux reposant sur des propriétés qualitatives et quantitatives (Khabbaz *et al.*, 2009). Elle demande néanmoins, la définition des règles d'inférences, ce qui oblige le concepteur à considérer des fonctions d'appartenance avec le minimum de sous-ensembles flous possible pour éviter de rendre la définition des règles d'inférence trop compliquée. Nous pouvons également remarquer le travail de Liao (Liao, 1996) qui présente un cadre d'évaluation par logique floue pour l'aide à la prise de décision dans la sélection des matériaux. La méthode générale repose sur le principe d'extension de la logique floue (Zadeh, 1975), qui permet de simplifier la sélection des matériaux mais demande une automatisation du traitement des données plus importante.

3 DESCRIPTION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

3.1 Cadre de la méthode

La méthode proposée permet de sélectionner de manière environnementale les matériaux pour la fin de vie des produits en conception préliminaire. Les paramètres, relatifs aux différentes fins de vie, contenus dans la littérature sont repris pour évaluer les matériaux. L'évaluation est donc personnalisée pour chaque fin de vie. Les fins de vie prises en compte sont celles de ELDA (Rose, C. *et al.*, 2000) : EOL1 : Reuse ; EOL2 : Service ; EOL3 : Remanufacture ; EOL4 :Recycle with disassembly ; EOL5 :Recycle without disassembly ; EOL6 : Disposal. La méthode se base sur la prise en compte du contexte d'utilisation des matériaux : l'environnement, le produit et les matériaux déjà présents dans le produit pour évaluer quel est le meilleur matériau. Elle doit pouvoir utiliser les données disponibles pendant la conception préliminaire : celles-ci peuvent être vagues et imprécises (Ashby, 2005). Nous avons donc fait le choix de traiter les données par logique floue comme Thurston le recommande (Thurston and Locascio, 1994) pour l'évaluation des matériaux en conception préliminaire. La figure 2 illustre le cadre de la méthode proposée.

La méthode proposée dans cet article en est une de sélection environnementale. Elle ne tient pas compte des paramètres techniques ou économiques. Cependant, la méthode doit s'adapter aux contraintes techniques et économiques. Pour cela, le concepteur peut indiquer si un composant doit être obligatoirement fabriqué à partir d'un matériau. Par exemple, le matériau d'un ressort sera nécessairement en acier pour permettre de stocker suffisamment d'énergie et garder toute sa fonctionnalité. La liberté est laissée au concepteur pour qu'il puisse choisir le meilleur matériau du point de vue environnemental tout en satisfaisant les contraintes techniques ou économiques.

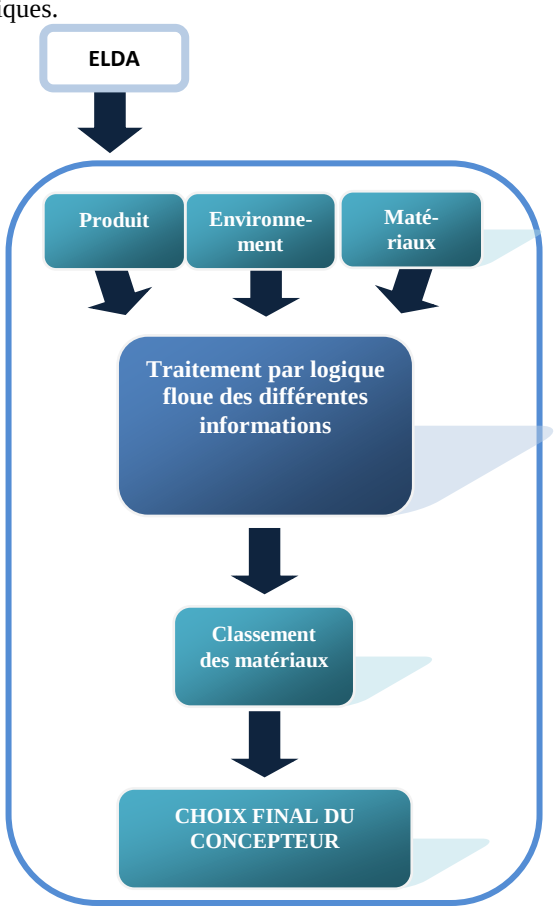

Figure 2 : Cadre général de la méthode de sélection environnementale des matériaux

3.2 Logique floue

La logique floue repose sur les ensembles flous définis par Zadeh (Zadeh, 1965). Zadeh définit un sous-ensemble flou $\tilde{A}$ de X par une fonction d'appartenance $f_{\tilde{A}}$ qui relie chaque élément x de X à un nombre réel dans l'intervalle [0,1]. La valeur de la fonction $f_{\tilde{A}}$ représente l'appartenance de x à $\tilde{A}$. Les fonctions d'appartenances des sous-ensembles flous peuvent avoir plusieurs formes : triangulaire, carré, rectangulaire, trapézoïdale, peigne. La méthode proposée dans cet article est basée sur le cadre d'évaluation floue multicritère de Liao (Liao, 1996). Le cadre d'évaluation repose sur le principe d'extension qui a été présenté par Zadeh (Zadeh, 1965) et complété par la théorie d'arithmétique floue de Kaufmann (Kaufmann and Gupta, 1985). Les équations et principes qui régissent la théorie d'arithmétique floue sont présents en Appendix.

L'évaluation des matériaux développée dans cet article nécessite le déroulement des trois étapes suivantes représentées en figure 3 :

- Calcul de l'indice d'EOL-abilité de chaque propriété j pour chaque matériau i : Sij
- Calcul de l'indice d'EOL-abilité global de chaque matériau : Si
- Défuzzification de l'indice d'EOL-abilité Si

Nous détaillons dans la suite de ce paragraphe les différentes opérations de calcul.
Soit :

- $\tilde{S}_{ij}$ l'indice de la propriété j du matériau i;
- $\widetilde{AP}_{ij}$ la valeur de la propriété j du matériau i ajustée par rapport à la valeur optimale;
- $\tilde{D}_j = (da_j, db_j, dc_j, dd_j)$, la valeur optimale de la propriété;
- $\tilde{P}_{ij} = (pa_{ij}, pb_{ij}, pc_{ij}, pd_{ij})$ la valeur de la propriété j du matériau i,
- $\tilde{S}_i$, l'indice d'EOL-abilité global du matériau i;
- $\tilde{w}_j$, le poids de la propriété j, avec 1 < j < n et n le nombre de propriétés du matériau évaluées.

3.2.1 Calcul de l'indice d'EOL-abilité des propriétés

Si la valeur optimale correspond à la valeur la plus élevée possible de la propriété du matériau :

$$\tilde{S}_{ij} = (\widetilde{AP}_{ij} \ominus \tilde{D}_j) \oslash \tilde{D}_j$$
$$\widetilde{AP}_{ij} = nd_j \oplus (pa_{ij}, pb_{ij}, pc_{ij}, pd_{ij})$$
$$nd_j = |\min(pa_{ij}) - dd_j|$$

Si la valeur optimale correspond à la valeur la plus faible possible de la propriété du matériau :

$$\tilde{S}_{ij} = (\tilde{D}_j \ominus \widetilde{AP}_{ij}) \oslash \tilde{D}_j$$
$$\widetilde{AP}_{ij} = (pa_{ij}, pb_{ij}, pc_{ij}, pd_{ij}) \ominus nd_j$$
$$nd_j = |da_j - \max(pd_{ij})|$$

3.2.2 Calcul de l'indice d'EOL-abilité global Si

L'indice d'EOL-abilité du matériau i est égal à :

$$\tilde{S}_i = \frac{1}{n} \cdot \otimes [(\tilde{S}_{i1} \otimes \tilde{w}_1) \oplus (\tilde{S}_{i2} \otimes \tilde{w}_2) \oplus (\ldots) \oplus (\tilde{S}_{in} \otimes \tilde{w}_n)]$$

$\tilde{S}_i$ est de la forme : $\tilde{S}_i = (sa_i, sb_i, sc_i, sd_i)$.

3.2.3 Defuzzification de l'indice global d'EOL-abilité Si

Ainsi, d'après Liao, la note finale d'un matériau est directement calculable par l'équation suivante :

- $I_T^{\mu}(\tilde{S}_i)$, la note finale d'EOL-abilité du matériau;
- μ, le coefficient d'optimisme compris dans l'intervalle [0,1].

$$I_T^{\mu}(\tilde{S}_i) = \frac{1}{2}\left[\mu(sc_i + sd_i) + (1-\mu)(sa_i + sb_i)\right]$$

La chronologie des différentes étapes de l'évaluation de l'EOL-abilité des matériaux sont décrites ci-dessous par la figure 3.

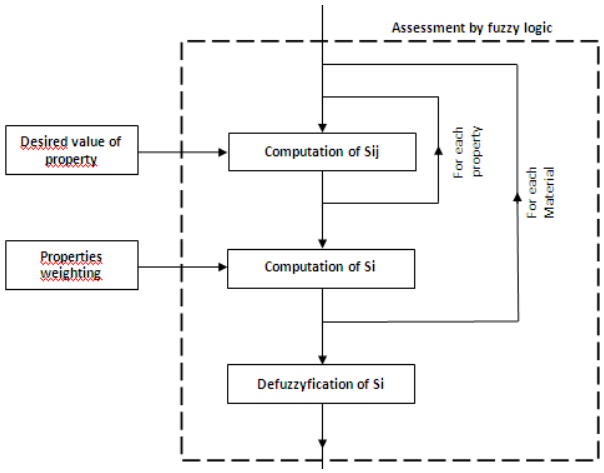

Figure 3 : Calculs nécessaires pour évaluer les matériaux

4 NOUVELLE MÉTHODE PROPOSÉE

La méthode repose sur le cadre présenté dans le paragraphe précédent. Nous détaillons, ici, les paramètres pris en compte, leurs origines et les relations entre le concepteur, la méthode et les matériaux. Neuf propriétés sont prises en compte pour évaluer et sélectionner les matériaux : résistance à la corrosion, recyclabilité, dégradabilité, uniformité du matériau dans le composant, diversité des matériaux dans le produit, marquage des matériaux sur les composants, compatibilité de recyclage, capacité de triage et durabilité. Ces différentes propriétés sont issues des règles de sélection environnementale. Le tableau 2 présente les différentes propriétés et leurs caractéristiques.

Nous pouvons distinguer deux types de données parmi les 9 propriétés : les propriétés qui ont des valeurs connues, constantes quelque soit le produit et les propriétés qui doivent être évaluées par le concepteur car elles dépendent du matériau, du produit et de l'environnement. Le premier type nécessite de stocker les valeurs des différents matériaux pour éviter d'avoir à les retrouver à chaque sélection environnementale de matériaux. Le deuxième type nécessite l'expertise et l'analyse du concepteur ou du logiciel pour choisir la valeur de la propriété du matériau (uniformité du matériau, diversité, marquage des composants, durabilité).

Propriétés	Relative selection rules	Validity domain						Fuzzy Number	Source des données	References
		EOL 1	EOL 2	EOL 3	EOL 4	EOL 5	EOL 6			
Résistance à la corrosion	15	X	X	X				Triangle	Handbook	[14-16]
Recyclabilité	6				X	X		Singletown	Government Data	[17-19]
Dégradabilité	16						X	Triangle	Handbook	[20, 21]
Uniformité du matériau dans le composant	8-9-10-11			X	X	X		Triangle	Designer assessment	-
Diversité des matériaux	13				X	X		Singletown	Product study	-
Marquage des matériaux	12	X	X	X	X			Triangle	Designer assessment	-
Compatibilité de recyclage	7				X	X		Triangle	Article	[22, 23]
Capacité de triage	7					X		Triangle	Government Data	[17, 19]
Durabilité	14	X	X	X				Triangle	Designer assessment	-

Tableau 2 : Compilation des caractéristiques et des propriétés évaluées, [14-16] : (Hamner, 1974 et 1975, ASM Handbook) ; [17-19] : (ADEME, 2010, EPA, 2010, Recyc-Québec, 2010) ; [20-21] : (Bastioli, 2005, Bradford, 2002) ; [22-23] : (SEI, 2006, Beitz, 1996)

Pour assurer une bonne répétabilité des évaluations il est nécessaire de guider le concepteur dans cette évaluation. Ainsi chaque propriété peut être définie à l'aide d'une table d'évaluation floue. Le tableau 3 est celle de l'uniformité du matériau dans le composant. La fonction d'appartenance de cette propriété est illustrée par la figure 4. L'évaluation des matériaux est réalisée en suivant les opérations décrites dans le paragraphe 3.2. Après classement des matériaux, le concepteur peut choisir le matériau qu'il souhaite. Notre méthode fournit une information au concepteur sur les matériaux par rapport à leur impact environnemental en fin de vie. L'adaptation de la méthode aux contraintes techniques et économiques rencontrées par le concepteur est réelle.

5 IMPLÉMENTATION DE LA METHODE

La méthode présentée ici a été implémentée dans un logiciel programmé en C++ : Environmental and Contextual Materials Selector for Product End-Of-Life

(ECMSPEOL). Il permet d'automatiser les opérations de recherche de données et de calculs. Nous utilisons un fichier externe pour stocker les différentes valeurs des propriétés des matériaux connues (résistance à la corrosion, recyclabilité, dégradabilité, compatibilité de recyclage, capacité de triage) et pour stocker les données nécessaires à l'évaluation par logique floue des matériaux (pondération des propriétés selon la fin de vie, valeurs optimales pour chaque propriété selon la fin de vie). La chronologie des différentes étapes de la sélection des matériaux par ECMSPEOL est illustrée dans la figure 5.

Valeur linguistique	Description	Valeur numérique
Très Faible	Le matériau est utilisé avec insert formé d'un autre matériau et de peinture, de revêtements non compatibles avec la fin de vie	[0 ; 0,25[
Faible	Le matériau est utilisé avec insert formé d'un autre matériau non compatible avec la fin de vie.	[0 ; 0,5[
Moyenne	Le matériau est utilisé avec plusieurs types de revêtements, peintures non compatibles avec la fin de vie.	[0,25 ; 0,75[
Forte	Le matériau est utilisé avec un revêtement ou une peinture non compatible avec la fin de vie.	[0,5 ; 1[
Très Forte	Le matériau est utilisé seul, sans inserts, peintures, ou revêtements non compatibles avec la fin de vie.	[0,75 ; 1]

Tableau 3 : Table d'évaluation de l'uniformité du matériau dans le composant

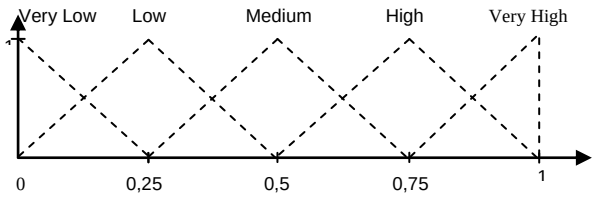

Figure 4 : Uniformité du matériau dans le composant

6 ÉTUDE DE CAS

6.1 Cas étudié et produit

Dans cette étude de cas nous souhaitons vérifier que la méthode créée répond au besoin : fournir une information pour aider le concepteur dans la sélection des matériaux pour la fin de vie. Nous testons la réaction du logiciel au changement de fin de vie du produit. Pour être sûr que nous mesurons bien l'influence de la fin de vie nous figeons les conditions initiales : pondération des propriétés, valeur désirée des propriétés, valeur réelle des propriétés des matériaux.

Le produit étudié est un vérin monostable. Il est très simple et est constitué de 6 composants différents. La figure 6 et le tableau 4 le décrivent. Il s'agit d'un produit déjà utilisé par Boothroyd (Boothroyd, 1984) pour illustrer sa méthode de conception pour l'assemblage et tiré d'un exemple industriel dans lequel le piston était en Al.

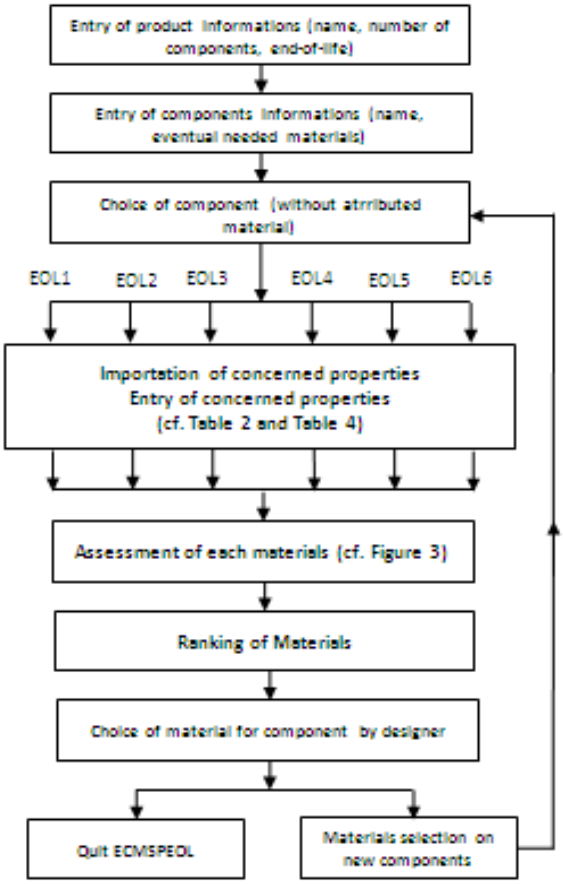

Figure 5 : Différentes étapes de la sélection des matériaux dans ECMSPEOL

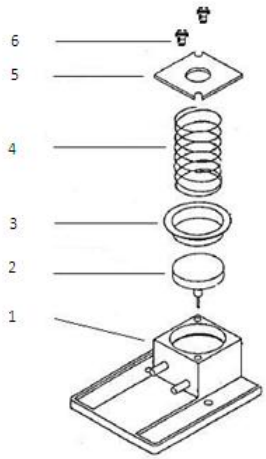

Figure 6 : Vue du vérin monostable

Deux composants du vérin doivent avoir des matériaux précis pour respecter les contraintes techniques du produit : le ressort doit être en acier pour pouvoir stocker suffisamment d'énergie pour assurer sa fonction et la butée doit être en PA (polyamide) pour absorber les chocs efficacement. Nous imposons ces contraintes techniques pour vérifier que la méthode présentée prend bien

en compte les spécificités du produit. Aussi, trois paramètres sont à indiquer par le concepteur durant le processus de sélection : le marquage des composants (fixé à « Moyen »), la durabilité du matériau dans les composants et l'uniformité du matériau dans les composants (Tableau 5). Les deux derniers paramètres sont dépendants du composant et du matériau. Six matériaux sont évalués dans notre étude de cas. Il s'agit de l'acier, de l'aluminium, du PE, du PA et du PVC.

Sigle	Nom du composant	Matériau Attribué
1	Corps	Acier
2	Piston	Aluminium
3	Butée	PA
4	Ressort	Acier
5	Couvercle	Acier
6	Vis	Acier

Tableau 4 : Nomenclature du vérin monostable

6.2 Résultats

L'étude de cas nous permet de quantifier deux comportements : l'influence de la fin de vie sur le classement fourni par ECMSPEOL et l'influence de la méthode sur le choix des matériaux par rapport au produit déjà conçu (Tableau 4) en considérant que le matériau classé en première position est attribué au matériau.

6.2.1 Influence de la fin de vie sur le classement fourni par ECMSPEOL

Un changement est comptabilisé lorsque la position d'un matériau dans le classement est modifiée par rapport au classement de référence. La divergence des classements est calculée par l'équation suivante :

$$\frac{Nb\ de\ changements}{Nb\ Matériaux\ évalués}$$

Ainsi, nous pouvons quantifier l'influence de la fin de vie sur le classement de chaque matériau Les résultats sont consignés dans la figure 7.

Composant	Aciers	Alliages d'Al	Alliages de Mg	PA	PVC	PE
Corps	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Faible	Faible	Faible
Piston	Forte	Très Forte	Très Forte	Forte	Forte	Forte
Ressort	Acier					
Butée	PA					
Couvercle	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Forte
Vis	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte	Très Forte

Tableau 5 : Valeur de l'uniformité entrée dans ECMSPEOL pour le vérin

6.2.2 Influence de la méthode sur l'attribution des matériaux

L'influence de la méthode sur l'attribution des matériaux est quantifiée en comparant la sélection des matériaux faite par ECMSPEOL avec l'attribution des matériaux du produit déjà conçu (Tableau 4). Ainsi nous calculons la divergence d'attribution avec l'équation suivante :

$$\frac{Nb\ de\ changements}{Nb\ de\ composants}$$

Un changement est comptabilisé lorsque le matériau d'un composant attribué par ECMSPEOL n'est pas le même que celui du produit déjà conçu (Figure 8).

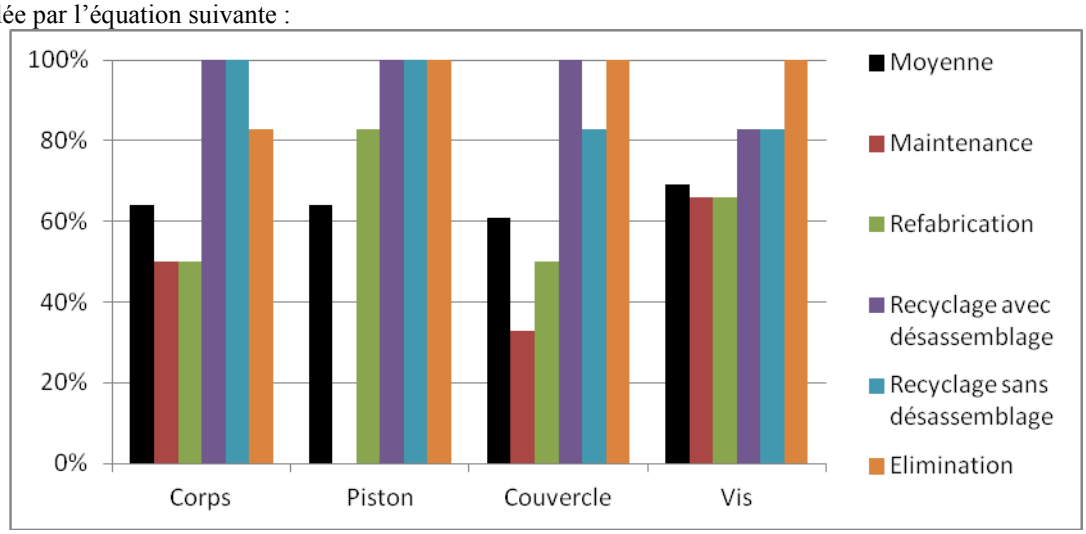

Figure 7 : Evolution du classement des matériaux selon la fin de vie pour chaque composant du vérin

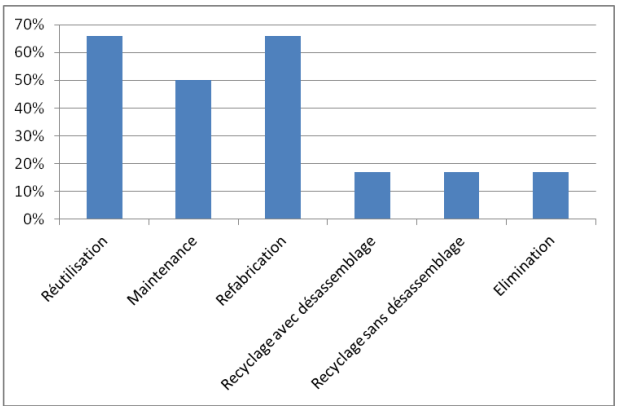

Figure 8: Influence de la fin de vie du produit sur l'attribution des matériaux.

6.2.3 Discussions

L'étude de cas nous permet de confirmer l'influence de la fin de vie sur le classement des matériaux d'ECMSPEOL. La divergence des classements obtenus par rapport à celui de référence (réutilisation) est comprise entre 33% et 100% selon les composants étudiés. De même, le calcul de la moyenne des divergences de classements pour chaque composant confirme notre observation : pour le vérin cette moyenne de divergence est comprise entre 61% et 69%. Il apparait certain que la fin de vie du produit influence le classement des matériaux réalisé par ECMSPEOL. Et que le classement évolue également en fonction du composant traité. Ce qui nous permet d'affirmer que la méthode proposée prend bien en compte la spécificité du produit et de ses composants dans la sélection des matériaux.

Concernant l'influence de la fin de vie sur l'attribution des matériaux, nous pouvons remarquer que les fins de vie de type réutilisation, maintenance et refabrication obtiennent des pourcentages de changement du même ordre pour les deux produits (supérieur ou égal à 50% de changement). Il en est de même pour les trois autres fins de vie (recyclage avec désassemblage, recyclage sans désassemblage et élimination).Le pourcentage moyen de changement de matériau pour le vérin est de 39%. Nous pouvons noter que le vérin déjà conçu avait une conception orientée recyclage élimination

7 CONCLUSION

Cet article a permis de présenter une nouvelle méthode de sélection environnementale des matériaux pour la fin de vie des produits. Après avoir étudié la littérature, nous avons décrit le cadre et le fonctionnement de la méthode proposée, ainsi que son implémentation et une étude de cas. Nous pouvons remarquer que la méthode permet de sélectionner les matériaux pour chaque fin de vie et pour chaque composant selon les caractéristiques des composants et des fins de vie du produit. De plus la méthode s'adapte aux contraintes techniques et économiques en laissant une liberté de choix au concepteur. Les études de cas ont montré que la méthode apporte réellement un surplus d'information par rapport aux méthodes existantes.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été subventionné par la Direction de la recherche et de l'innovation et le département de génie mécanique de l'École Polytechnique de Montréal.

REFERENCES

ADEME, 2010.

Amezquita, T., R. Hammond, M. Salazar, and B. Bras, 1995. Characterizing the remanufacturability of engineering systems. *ASME Advances in Design Automation Conf.*, Boston, p. 271-278. **[8]**

Ashby, M. F., 2005. *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann. **[21]**

ASM Handbook, 2001. Corrosion, vol. 13, Materials Park (USA): *ASM International*, p. 360-365.

Bastioli, C., 2005. Handbook of biodegradable polymers: *Smithers Rapra Technology*.

Behrendt, S., 1997. *Life cycle design: a manual for small and medium-sized enterprises*. Springer Verlag. **[13]**

Beitz, W., 1990. Design for Ease of Recycling (Guidelines VDI-2243). *ICED Proceedings*, vol. 90.

Bellmann, K. and A. Khare, 2000. Economic issues in recycling end-of-life vehicles. *Technovation*, 20(12), p. 677-690. **[14]**

Bhander, G.S., M. Hauschild and T. McAloone, 2003. Implementing life cycle assessment in product development. *Environmental Progress*, 22(4), p.255, **[3]**

Boothroyd, G. D., "Design For Assembly," Amherts, Massachussets 01003: Massachussets University, 1983.

Bradford, S., 2002. Corrosion control. *Casti Publishing*.

Chan, J. W. K. and T. K. L. Tong, 2007. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: grey relational analysis approach. *Materials and Design*, 28(5), p. 1539-1546.

Chen, S. M., 1997. A new method for tool steel materials selection under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 92(3), p. 265-274.

Cohen-Rosenthal, E., 2004. Making sense out of industrial ecology: a framework for analysis and

action. *Journal of Cleaner Production*, 12(8-10), p. 1111-1123. **[15]**

EPA (United States Environmental Protection Agency), 2007. *Electronics Waste Management in the United States.* Office of Solid Waste, Ed. Washington, DC.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 2010. *Electronics Waste Management in the United States.* Office of Solid Waste, Ed. Washington, DC.

Ermolaeva, N. S., M. B. G. Castro, and P. V. Kandachar, 2004. Materials selection for an automotive structure by integrating structural optimization with environmental impact assessment. *Materials and Design*, 25(8), p. 689-698.

Eskelinen, H., M. S. T. Luo, and X. Chen, 2004. DFM (A)-Analysis and Aspects of Applying Internet Based Collaborative Design for Axial Eccentric Oil-Pump Design. **[9]**

Frischknecht, R., N. Jungbluth, H. J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, and G. Rebitzer, 2005. The Ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(1), p. 3-9. **[19]**

Goedkoop, M., 1995. *The Eco-indicator 95, final report and manual for designers*. Amersfoort, NL: VKi Consultants. **[16]**

Goedkoop, M., 1999. *The Eco-indicator 99, An oriented method for life cycle impact assessment*. Amersfoort, NL: VKi Consultants. **[17]**

Giudice, F., G. La Rosa, and A. Risitano, 2005. Materials selection in the life-cycle design process: a method to integrate mechanical and environmental performances in optimal choice. *Materials and Design*, 26(1), p. 9-20.

Hamner, N. E., 1974. Corrosion Data Survey--Metals Section. *NACE*, P. O. Box 1499, Houston, Tex. 77001.

Hamner, N. E., 1975. Nonmetals Section Corrosion Data Survey. *Storming Media*.

Holloway, L., 1998. Materials selection for optimal environmental impact in mechanical design. *Materials and Design*, 19(4), p. 133-144.

Huang, H., G. Liu, Z. Liu, and J. Pan, 2006. Multi-objective decision-making of materials selection in green design. *Jixie Gongcheng Xuebao(Chinese Journal of Mechanical Engineering)*, 42(8), p. 131-136.

Jolliet, O., M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer, and R. Rosenbaum, 2003. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6), p. 324-330. **[18]**

Karana, E., P. Hekkert, and P. Kandachar, 2008. Material considerations in product design: A survey on crucial material aspects used by product designers. *Materials & Design*, 29(6), p. 1081-1089.

Kaufmann, A. and M. M. Gupta, 1985. *Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications*. Van Nostrand Reinhold New York.

Kaufmann, A. and M. M. Gupta, 1988. *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science*. New York: Elsevier Science Publishers.

Khabbaz, R. S., B. D. Manshadi, A. Abedian, and R. Mahmudi, 2009. A simplified fuzzy logic approach for materials selection in mechanical engineering design. *Materials & Design*, 30, p. 687–697.

Liao, T. W., 1996. A fuzzy multicriteria decision-making method for material selection. *Journal of manufacturing systems*, 15(1), p. 1-12.

Lin, B., C. A. Jones, and C. Hsieh, 2001. Environmental practices and assessment: a process perspective. *Industrial Management and Data Systems*, 100(1), p.71-79, **[4]**

Lin, F. and L. Lin, 2003. A Discussion of the State-of-art Research on Environmentally Conscious Material Selection Methodologies for the Reduction of Products'Toxic Impact. *The Journal of Sustainable Product Design*, 3(3), p. 119-134. **[10]**

Ljungberg, L. Y., 2007. Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials and Design*, 28(2), p. 466-479.

Pahl, G. and W. Beitz, 2007. *Engineering Design: A systematic approach*. S. London, Ed. **[20]**

Recyc-Québec, 2010.

Ribeiro, I., P. Pecas, A. Silva, and E. Henriques, 2008. Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study. *Journal of Cleaner Production*, 16(17), p. 1887-1899.

Rose, C. M., A. Stevels, and K. Ishii., 2000. *A new approach to end-of-life design advisor (ELDA)*. San Francisco, CA, United states, p. 99-104.

Sarkis, J., 1998 Evaluating environmentally conscious business practices. *European Journal of Operational Research*, 107(1), p. 159-174. **[5]**

SEI, 2006. ECO-DESIGN Sectoral Manual for Furniture.

Shanian, A. and O. Savadogo, 2006. TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources*, 159(2), p. 1095-1104.

Stuart, J. A. and R. M. Sommerville, 1998. Materials selection for life cycle design. *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, p. 151-158. **[11]**

Telenko, C., C. C. Seepersad and M. E. Webber, 2008. A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines. *ASME DETC Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference*, Brooklyn, New York. **[7]**

Thurston, D. L. and A. Locascio, 1994. Decision theory for design economics. *The Engineering Economist: A Journal Devoted to the Problems of Capital Investment*, 40(1), p. 41-71.

Wang, M. J. J. and T. C. Chang, 1995. Tool steel materials selection under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 72(3), p. 263-270.

Weaver, P. M., M. F. Ashby, S. Burgess, and N. Shibaike, 1996. Selection of materials to reduce environmental impact: a case study on refrigerator insulation. *Materials and Design*, 17(1), p. 11-18. **[22]**

Xing, K., K. Abhary and L. Luong, 2003. IREDA: An Integrated Methodology for Product Recyclability and End-of-life Design. *The Journal of Sustainable Product Design*, 3(3), p. 149-171. **[6]**

Zadeh, L. A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning--I* 1. *Information sciences*, 8(3), p. 199-249.

Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy sets. *Information & Control*, Vol. 8, p. 338-353.

Zhou, C.-C., G.-F. Yin, and X.-B. Hu, 2009. Multi-objective optimization of material selection for sustainable products: Artificial neural networks and genetic algorithm approach. *Materials & Design*, 30(4), p. 1209-1215.

APPENDIX

Théorie d'arithmétique floue

- <u>Addition :</u>

  k $\oplus$ (a, b, c, d) = $(k + a, k + b, k + c, k + d)$ avec k constant

  $(w, x, y, z) \oplus (a, b, c, d) = (w + a,\ x + b,\ y + c,\ z + d)$

- <u>Soustraction :</u>

  $(a, b, c, d) \ominus$ k $= (a - k\ ,\ b - k\ ,\ c - k\ ,\ d - k)$ avec k constant

  $(w, x, y, z) \ominus (a, b, c, d) = (w - a,\ x - b,\ y - c,\ z - d)$

- <u>Multiplication :</u>

  k $\otimes$ (a, b, c, d) = $(k.a\ ,\ k.b\ , k.c\ ,\ k.d)$ avec k constant

  $(w, x, y, z) \otimes (a, b, c, d) \approx (w.a,\ x.b,\ y.c,\ z.d)$ si w, a ≥ 0

- <u>Division :</u>

  $(w, x, y, z) \oslash (a, b, c, d) \approx (\frac{w}{d}\ ,\ \frac{x}{c}\ ,\ \frac{y}{b}\ ,\ \frac{z}{a})$ si w, a ≥ 0

- <u>Changement de signe :</u>

  $-(a, b, c, d) = (-d\ , -c\ , -b\ , -a)$